

Software de Base, Métricas y Aplicaciones en Arquitecturas Multiprocesador orientadas a Cómputo de Altas Prestaciones

De Giusti Armando^{1,2}, Tinetti Fernando^{1,3}, Naiouf Marcelo¹, Chichizola Franco¹, De Giusti Laura¹, Villagarcía Horacio^{1,3}, Montezanti Diego¹, Frati Emmanuel¹, Pousa Adrián¹, Rodríguez Ismael¹, Eguren Sebastián¹, Denham Mónica^{1,2}, Iglesias Luciano¹, Mendez Mariano⁴

¹Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI)

Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata

²CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³CIC – Comisión de Investigaciones de la Pcia. de Buenos Aires

⁴Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires

{degiusti, fernando, mnaiouf, francoch, ldgiusti, hvw, dmontezanti, fefrati, apousa, ismael, seguren, mdenham, li}
@lidi.info.unlp.edu.ar, marianomendez@gmail.com

Con la colaboración en la dirección de Tesis de Posgrado de la Universidad Autónoma de Barcelona (España) y la Universidad Complutense de Madrid (España).

Contexto

Esta línea de Investigación está dentro del proyecto 11/F018: “Arquitecturas multiprocesador en HPC: Software de base, Métricas y Aplicaciones acreditado por el Ministerio de Educación y de proyectos específicos apoyados por organismos nacionales e internacionales.

El III-LIDI forma parte del Sistema Nacional de Cómputo de Alto Desempeño (SNCAD) del MINCYT y en esta línea de I/D hay cooperación con varias Universidades de Argentina y se está trabajando con Universidades de América Latina y Europa en proyectos financiados por CyTED, AECID y la OEI (Organización de Estados Iberoamericanos).

En la Facultad de Informática de la UNLP (a partir del equipo del proyecto) se han incorporado asignaturas optativas en la curricula de grado de las carreras de Licenciatura en Informática, Licenciatura en Sistemas e Ingeniería en Computación relacionadas con Cloud Computing, Big Data y Programación sobre GPGPUs. Además, la Facultad aprobó y financia el proyecto “HPC y Cloud Computing. Aplicaciones”.

Se participa en iniciativas como el Programa IberoTIC de intercambio de Profesores y Alumnos de Doctorado en el área de Informática, así como el desarrollo de la Maestría y Especialización en Computación de Altas Prestaciones, acreditadas por CONEAU.

Por último, se tiene financiamiento de Telefónica de Argentina en Becas de grado y posgrado y se ha tenido el apoyo de diferentes empresas (IBM, Microsoft, Telecom, INTEL, AMAZON AWS) en las temáticas de Cloud Computing y Big Data.

Resumen

Caracterizar las arquitecturas multiprocesador distribuidas enfocadas especialmente a cluster y cloud computing, con énfasis en las que utilizan procesadores de múltiples núcleos (multicores y GPUs), con el objetivo de modelizarlas, estudiar su escalabilidad, analizar y predecir performance de aplicaciones paralelas, estudiar el consumo energético y su impacto en la performance así como desarrollar esquemas para detección y tolerancia a fallas en las mismas.

Profundizar el estudio de arquitecturas basadas en GPUs y su comparación con clusters de multicores, así como el empleo combinado de GPUs y multicores en computadoras de alta performance. En particular estudiar performance en Clusters “híbridos”.

Analizar y desarrollar software de base para clusters de multicores y GPUs, tratando de optimizar el rendimiento.

Investigar arquitecturas multicore asimétricas, sus aplicaciones y el software de base de las mismas apuntando a optimizar el rendimiento de aplicaciones de propósito general.

A partir del año 2013 se han incorporado nuevas líneas de interés:

- Cloud computing, incluyendo aplicaciones de HPC sobre cloud.
- El desarrollo de aplicaciones que integran Big Data y procesamiento sobre Cloud.
- La utilización de los registros de hardware de los procesadores para la toma de diferentes decisiones en tiempo de ejecución.
- El desarrollo de herramientas para la transformación de código heredado, buscando su optimización sobre arquitecturas paralelas.

Es de hacer notar que este proyecto se coordina con otros proyectos en curso en el III-LIDI,

relacionados con Algoritmos Paralelos, Sistemas Distribuidos y Sistemas de Tiempo Real.

Palabras claves: *Sistemas Paralelos. Multicore. GPU. Cluster y Cloud Computing. Cluster híbridos. Performance y eficiencia energética. Tolerancia a fallas en Sistemas paralelos. Modelos de programación de arquitecturas paralelas. Planificación. Scheduling. Virtualización.*

Introducción

La investigación en Paralelismo (a partir de arquitecturas multiprocesador distribuidas o concentradas en supercomputadoras) es una de las líneas de mayor desarrollo en la Ciencia Informática actual. La utilización de clusters, multiclusters, grids y clouds, soportadas por redes de diferentes características y topologías se ha generalizado, tanto para el desarrollo de algoritmos paralelos orientados a HPC como para el manejo de aplicaciones distribuidas y/o servicios WEB concurrentes.

El cambio tecnológico, fundamentalmente a partir de los procesadores multicore, ha impuesto la necesidad de investigar en paradigmas "híbridos", en los cuales coexisten esquemas de memoria compartida con mensajes. Asimismo la utilización de procesadores gráficos (GPUs) como arquitecturas paralelas presenta una alternativa para alcanzar un alto speedup en determinadas clases de aplicaciones. Debe notarse que el modelo de programación orientado a GPUs cambia sensiblemente y la optimización de código paralelo requiere nuevos recursos.

Es importante en este contexto re-analizar el concepto de *eficiencia* incluyendo tanto al aspecto computacional como el energético y considerar el impacto del consumo sobre arquitecturas con miles de procesadores que trabajan concurrentemente, este concepto extendido de eficiencia conduce a un estudio de nuevos lenguajes, paradigmas y herramientas.

Asimismo, aparecen líneas de I/D tales como la integración de arquitecturas heterogéneas con diferente performance según el tipo de aplicación, la planificación y scheduling dinámico basado en la carga de trabajo y en el consumo del sistema paralelo, el control en tiempo real de la frecuencia de reloj de los procesadores para optimizar consumo y el uso de los registros de hardware para la toma de decisiones en tiempo de ejecución.

Por otra parte, se profundiza el estudio y desarrollo de lenguajes, compiladores, estructuras de datos y soporte de comunicaciones adecuados a estas arquitecturas, así como se enfatizan los problemas de detección y tolerancia a fallos tratando de minimizar el overhead de tiempo y aprovechando la redundancia de hardware (nivel de ocupación de los núcleos) que caracteriza estas arquitecturas.

Al enfocarnos en Cloud Computing aparecen problemas clásicos de la Ciencia Informática, extendidos para este nuevo modelo de arquitectura: planificación, virtualización, asignación dinámica de recursos, migración de datos y procesos.

Naturalmente a mayor potencia del Cloud, también crecen las complejidades al analizar la comunicación y el acceso a memoria en arquitecturas que están distribuidas y a su vez conformadas por placas con un número variable de procesadores multicore y/o GPUs.

En el proyecto se ha abierto una línea específicamente dedicada a Cloud Computing, incluyendo los temas de configuración y administración eficiente de Cloud, así como las aplicaciones sobre Cloud incluyendo las de "big data".

Definiciones básicas

Un *procesador multicore* integra dos o más núcleos computacionales dentro de un mismo "chip". La motivación de su desarrollo ha sido incrementar el rendimiento, reduciendo el consumo de energía en cada núcleo.

Una GPU (Graphics Processing Unit) es una arquitectura multicore dedicada a procesamiento gráfico, con un gran número de cores simples. En los últimos años, estas arquitecturas, están siendo utilizadas en aplicaciones de propósito general logrando un alto rendimiento y dando lugar al concepto de GPGPU (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units).

Un *cluster* es un sistema de procesamiento paralelo compuesto por un conjunto de computadoras interconectadas vía algún tipo de red, las cuales cooperan configurando un recurso que se ve como "único e integrado", más allá de la distribución física de sus componentes. Cada "procesador" puede tener diferente hardware y sistema operativo, e incluso puede ser un "multiprocesador". La combinación de multicores y GPUs en un mismo cluster es un tema actual, por las diferencias de arquitectura y del soporte de software de base que se ha desarrollado para cada uno de ellos. Esto es lo que denomina un "cluster híbrido".

Un *Grid* es un tipo de sistema distribuido que permite seleccionar, compartir e integrar recursos autónomos geográficamente distribuidos. En los últimos años las aplicaciones de Grid están siendo reemplazadas por las arquitecturas Cloud, que tienen un soporte de hardware y software más estandarizado.

Las arquitecturas tipo "*Cloud*" se presentan como una evolución natural del concepto de *Clusters* y *Grids*, integrando grandes conjuntos de recursos virtuales (hardware, plataformas de desarrollo y/o servicios), fácilmente accesibles y utilizables por usuarios distribuidos, vía WEB. Estos recursos pueden ser dinámicamente reconfigurados para

adaptarse a una carga variable, permitiendo optimizar su uso. Desde el punto de vista de la investigación tecnológica el mayor problema es el acceso directo a los recursos de hardware y el software de base de un Cloud (en general sistemas propietarios de grandes empresas/organizaciones).

Complementariamente hay temas de importancia como la transformación y optimización de código heredado (en particular para aplicaciones científicas), la utilización de herramientas de análisis y seguimiento de la ejecución de código concurrente/paralelo tales como los contadores de hardware y particularmente los temas vinculados con sistemas distribuidos de tiempo real, tales como redes de sensores, aplicaciones tipo "Internet de las cosas", sistemas embebidos de alta performance, sistemas operativos de tiempo real y protocolos de comunicación para aplicaciones industriales y de medición en tiempo real.

Interesan también los problemas que significan integración de redes de sensores con modelos del mundo real (por ej. modelos meteorológicos, hídricos o de terreno) para prevención de emergencias. En esta línea, el eje del proyecto sigue estando en la problemática del paralelismo combinado con sistemas de tiempo real, pudiendo contribuir a proyectos multidisciplinarios, en particular por temas de emergencias hídricas, exploración de recursos naturales y temas de atención sanitaria y evacuación de edificios en situaciones de emergencia.

Aspectos de interés

- A partir de la complejidad creciente del hardware, se hace más desafiante el desarrollo de capas de software eficiente, desde el middleware hasta los lenguajes de aplicación.
- El incremento en el número de procesadores disponibles en clusters, grids y clouds obliga a poner énfasis en el desarrollo de los algoritmos de virtualización de modo de explotar la arquitectura con más de una aplicación concurrente.
- La heterogeneidad es inevitable en estos sistemas paralelos complejos. A su vez es un factor que condiciona la predicción de performance y consumo.
- El desarrollo de procesadores asimétricos es una línea de interés por la posibilidad de especializar algunos núcleos a funciones específicas, optimizando el rendimiento general.
- Los modelos de predicción de performance resultan especialmente complejos. Es de interés el estudio de esquemas sintéticos ("firmas") propios de la aplicación para estimar tiempos y consumo, ejecutando un código mínimo frente al de la aplicación real.
- Los problemas clásicos de scheduling y mapeo de procesos a procesadores tienen nuevos objetivos (en particular los relacionados con el

consumo) y deben considerar la migración dinámica de datos y procesos en función de performance y consumo. Para esto se vuelve importante la investigación en el empleo de los contadores de hardware.

- La detección y tolerancia a fallos de hardware y software se vuelve un punto crítico al operar sobre arquitecturas con gran número de procesadores que pueden reconfigurarse dinámicamente.
- Transformar y optimizar código científico "heredado".
- Trabajar sobre modelos complejos, que integren redes de sensores en tiempo real y cómputo paralelo. Estrategias de predicción de catástrofes (inundaciones, incendios por ejemplo) se basan en modelos complejos, capacidad de procesamiento y monitoreo de señales en tiempo real.

Líneas de Investigación y Desarrollo

- Estudio y caracterización de las arquitecturas multiprocesador distribuidas.
- Modelos de predicción de rendimiento sobre estas arquitecturas paralelas.
- Investigación de las arquitecturas "híbridas" (que combinan multicores y GPUs) y su rendimiento, así como investigación en los patrones de programación eficiente de algoritmos híbridos que exploten simultáneamente el paradigma de mensajes y el de memoria compartida.
- Estudio, desarrollo y optimización de middleware (software de base) para estas arquitecturas y su vinculación eficiente con la capa de aplicaciones.
- Desarrollo de aplicaciones concretas (numéricas y no numéricas) y el estudio de paradigmas y patrones para los algoritmos paralelos sobre arquitecturas multiprocesador.
- Análisis y diseño de arquitecturas y software con capacidad de tolerancia a fallas en arquitecturas multiprocesador distribuidas.
- Estudios de escalabilidad de las arquitecturas y la relación entre escalabilidad, distribución de los procesadores y performance.
- Investigación de técnicas de optimización en tiempo real, que incluyan el empleo de los contadores de hardware.
- Actualización y modernización de código fuente de Sistemas Heredados (Legacy Systems) de Cómputo Científico a través de la aplicación de un proceso de desarrollo iterativo e incremental dirigido por transformaciones de código fuente, apoyado fuertemente en las herramientas de desarrollo. Dichas transformaciones se implementan para ser aplicadas automáticamente en un entorno integrado de desarrollo.

- Trabajar en la implementación de ciertas transformaciones que ayuden a la paralelización del código fuente, así como también en herramientas de análisis estático de Código fuente.
- Estudio y desarrollo de modelos y aplicaciones paralelas y de cómputo intensivo relacionados con problemas ambientales, incluyendo simulación.
- Estudio de aplicaciones vinculadas con "Big Data" (en relación con los otros proyectos del III-LIDI)

Formación de Recursos Humanos

En cooperación con Universidades iberoamericanas se ha implementado la Maestría en Cómputo de Altas Prestaciones y se continúa dictando la Especialización en Cómputo de altas Prestaciones y Tecnología GRID. Asimismo se tiene un importante número de doctorandos (del país y del exterior) realizando el Doctorado en Ciencias Informáticas de la UNLP.

Se han organizado las Jornadas de Cloud Computing, integrando una Escuela con cursos de Posgrado relacionados con la temática.

Existe cooperación a nivel nacional e internacional y dentro de la temática del proyecto se espera alcanzar 7 Tesis de Doctorado y 5 Tesis de Maestría en los próximos 4 años, en el país. Al menos tener 3 Doctorandos en el exterior o mixtos en el mismo período.

En 2014 se aprobaron 2 Tesis Doctorales y otras 2 están entregadas para evaluación. También se aprobaron 4 trabajos de Especialista, 3 Tesis de Magister y 3 Tesinas de grado.

Bibliografía

1. Grama A, Gupta A, Karypis G, Kumar V. "Introduction to parallel computing". Second Edition. Pearson Addison Wesley, 2003.
2. McCool M., Robison A., Reinders J. "Structured Parallel Programming" Elsevier-Morgan Kaufmann, 2012.
3. Mayer-Schönberger V., Cukier K., "Big Data: A revolution that will transform how we live, work and think" Houghton Mifflin Harcourt 2013.
4. Herlihy M., Shavit N., "The art of multiprocessor programming". Elsevier-Morgan Kaufmann, 2012.
5. Dongarra J, Foster I, Fox G, Gropp W, Kennedy K, Torczon L, White A. "The Sourcebook of Parallel Computing". Morgan Kaufman Publishers. Elsevier Science, 2003.
6. Ben-Ari, M. "Principles of Concurrent and Distributed Programming, 2/E". Addison-Wesley, 2006.
7. Miller M. "Cloud computing: web-based applications that change the way you work and collaborate online". Que Publishing. USA 2008.
8. Ghosh S. "Distributed System. An Algorithmic Approach". Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series. 2006.
9. Leibovich F., Chichizola F., De Giusti L., Naiouf M., Tirado Fernández F., De Giusti A. "Programación híbrida en clusters de multicore. Análisis del impacto de la jerarquía de memoria". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 306-315. 2012.
10. General-Purpose Computation on Graphics Processing Units. <http://gpgpu.org>.
11. Pousa A., Sanz V., De Giusti A. "Análisis de rendimiento de un algoritmo de criptografía simétrica sobre arquitecturas multicore", Proceedings del XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2011), La Plata (Argentina), 2011, ISBN: 978-950-34-0756-1. Págs: 231-240.
12. De Giusti L., Chichizola F., Naiouf M., De Giusti A.E., Luque E. "Automatic Mapping Tasks to Cores - Evaluating AMTHA Algorithm in Multicore Architectures". IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 2, No 1, March 2010. ISSN (Online): 1694-0784. ISSN (Print): 1694-0814. Págs. 1-6.
13. Olszewski M., Ansel J., Amarasinghe S. "Kendo: Efficient Deterministic Multithreading in Software". Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, 2009.
14. Bertogna M., Grosclaude E., Naiouf M., De Giusti A., Luque E. "Dynamic on Demand Virtual Clusters in Grids". 3rd Workshop on Virtualization in High-Performance Cluster and Grid Computing. VHPC 08 -España. Agosto 2008.
15. Frati E., Olcos Herrero K., Piñuel Moreno L., Montezanti D., Naiouf M., De Giusti A. "Optimización de herramientas de monitoreo de errores de concurrencia a través de contadores de hardware". Proceedings del XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2011), La Plata (Argentina), 2011, ISBN: 978-950-34-0756-1. Págs: 337-346.
16. Frati F. E., Olcos Herrero K., Piñuel Moreno L., Naiouf M., De Giusti A. "Detección de interleavings no serializables usando contadores de hardware". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC 2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 327-336. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2012.
17. Shirako J. et al. "Compiler Control Power Saving Scheme for Multi Core Processors". LNCS, pp. 362-376. Mayo 2007.
18. Vaquero L.M. et al. "A Break in the Clouds: Towards a Cloud Definition". ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 39, num. 1, páginas 50-55, ISSN 0146-4833. Enero 2009.
19. Foster I. "There's Grid in them thar Clouds". 2 de Enero, 2008. <http://ianfoster.typepad.com/blog/2008/01/theres-grid-in.html>. Noviembre, 2010.
20. Burger T. W. "Intel Multi-Core Processors: Quick Reference Guide". http://cachewww.intel.com/cd/00/00/23/19/231912_231912.pdf
21. Balladini J., Rucci E., De Giusti A., Naiouf M., Suppi R., Rexachs D., Luque E. "Power Characterisation of Shared-Memory HPC Systems". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC 2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 316-326. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2012.
22. Montes de Oca E., De Giusti L., De Giusti A., Naiouf M. "Comparación del uso de GPU y cluster de multicore en problemas con alta demanda

- computacional". XII Workshop de Procesamiento Distribuido y Paralelo. CACIC2012. ISBN: 978987-1648-34-4. Pág. 267-275. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2012.
23. Kindratenko, V.V.; Enos, J.J.; Guochun Shi; Showerman, M.T.; Arnold, G.W.; Stone, J.E.; Phillips, J.C.; Wen-Mei Hwu, "GPU clusters for high-performance computing," Cluster Computing and Workshops, 2009. CLUSTER '09. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,8, Aug. 31 2009-Sept. 4 2009
24. Malony A., Biersdorff S., Shende S., Jagode H., Tomov S., Juckeland G., Dietrich R., Duncan Poole P., Lamb C. "Parallel Performance Measurement of Heterogeneous Parallel Systems with GPUs", International Conference on Parallel Processing (ICPP'11), Taipei, Taiwan, September 13-16, 2011.
25. Sinha, R.; Prakash, A.; Patel, H.D., "Parallel simulation of mixed-abstraction SystemC models on GPUs and multicore CPUs," Design Automation Conference (ASP-DAC), 2012 17th Asia and South Pacific, pp.455,460, Jan. 30 2012-Feb. 2 2012.
26. Lingyuan Wang, Miaoqing Huang, and Tarek El-Ghazawi. "Towards efficient GPU sharing on multicore processors". In Proceedings of the second international workshop on Performance modeling, benchmarking and simulation of high performance computing systems (PMBS '11). ACM, New York, NY, USA, 23-24.
27. Bertogna M. L. "Planificación dinámica sobre entornos Grid". Ph.D. thesis, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, 2010.
28. Grid Computing Infocentre: <http://www.gridcomputing.com/>
29. Ardissono L., Goy A., Petrone G., Segnan M. "From Service Clouds to User-centric Personal Clouds". 2009 IEEE Second International Conference on Cloud Computing.
30. Tinetti F. G., Méndez M. "Fortran Legacy software: source code update and possible parallelisation issues", ACM SIGPLAN Fortran Forum, Volume 31 Issue 1, April 2012, ACM New York, NY, USA, ISSN: 1061-7264, pp. 5-22.
31. Méndez M., Overbey J., Tinetti F. G. "Legacy Fortran Software: Applying Syntactic Metrics to Global Climate Models", CACIC 2012 - XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, Octubre 8-12 de 2012, ISBN 978-987-1648-34-4, pp. 847-856.
32. Eastwood A. "Firm Fires Shots at Legacy Systems", Computing Canada, No1. 19, No. 2, 1993.
33. Perf: Linux profiling with performance counters, https://perf.wiki.kernel.org/index.php/Main_Page
34. Moore S., Ralph J. "User-defined Events for Hardware Performance Monitoring," ICCS 2011 Workshop:Tools for Program Development and Analysis in Computational Science, www.sciencedirect.com, Singapore, June 1, 2011.
35. Davis R. "Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised". Real-Time Systems. Springer, vol. 35, n° 3, pp. 239-272, 2007.
36. Singh B. D. "Influence of Digital Elevation Models Derived from Remote Sensing on SpatioTemporal Modelling of Hydrologic and Erosion Processes". Thesis for Degree of Doctor of Philosophy. pp 370. Cranfield University Siloe England. 2006.
37. Vázquez Blanco C., Huedo E., Montero R. S., Llorente I. M. "Elastic Management of Cluster-based Services in the Cloud". Proceedings pp. 19-24, ACM Digital Library 2009. ISBN 978-1-60558-564-2.
38. Muresano Cáceres R. "Metodología para la aplicación eficiente de aplicaciones SPMD en clústers con procesadores multicore" Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, Julio 2011.
39. Sáenz J. C. "Planificación de Procesos en Sistemas Multicore Asimétricos". Ph.D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, Diciembre 2010.
40. Annamalai A., Rodrigues R., Koren I., Kundu S., "Dynamic Thread Scheduling in Asymmetric Multicores to Maximize Performance-per-Watt," 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, pp. 964-971, 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, 2012.
41. Corredor Franco J. "Predicción de perfiles de comportamiento de aplicaciones científicas en nodos multicore". Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, Julio 2011.
42. Lu S., Tucek J., Qin F., Zhou Y. "AVIO: detecting atomicity violations via access interleaving invariants". SIGPLAN Not, ACM, 2006, 41, 37-48.
43. Golander A., Weiss S., Ronen R. "Synchronizing Redundant Cores in a Dynamic DMR Multicore Architecture". IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs Volume 56, Issue 6, 474-478. 2009.
44. Fialho L. "Fault Tolerance configuration for uncoordinated checkpoints". Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, Julio 2011.
45. Frati E. "Software para arquitecturas basadas en procesadores de múltiples núcleos. Detección Automática de errores de concurrencia" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Marzo 2015.
46. Sanz V. "Análisis de rendimiento y optimización de algoritmos paralelos Best-First Search sobre multicore y cluster de multicore" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Diciembre 2014.
47. Wolfmann G. "Parallel Execution Model based on Petri Nets" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Febrero 2015.
48. Micolini O. "Arquitectura asimétrica multicore con procesador de Petri" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Marzo 2015.
49. AMAZON AWS Becas Académicas. <https://aws.amazon.com/es/grants/>.